

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ivančica Cvetko

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada :

Dr. sc. Većeslav Čorić

Ivančica Cvetko

Zagreb, 2009.

SADRŽAJ

1. SAŽETAK.....	1
2. ODREĐIVANJE HIDRODINAMIČKIH ZNAČAJKI TRUPA.....	2
3. PRIJENOSNA KRIVULJA PONIRANJA I POSRTANJA NA HARMONIJSKOM VALU.....	5
4. UZBUDA NA HARMONIJSKOM DUGAČKOM VALU.....	13
5. PRORAČUN PONIRANJA I POSRTANJA POMOĆU PROGRAMA WAVESHIP.....	17
6. ZAKLJUČAK	26
7. LITERATURA.....	28

POPIS SLIKA

Sl.2.1 Forma određena iz jednadžbe i duljine broda

Sl 2.2 Raspored masa po duljini

Sl. 4.1 Prijenosne krivulje poniranja i posrtanja

Sl. 5.1 Projekcija forme u x-z ravnini

Sl. 5.2 Projekcija forme u x-y ravnini

Sl. 5.3 Projekcija forme u y-z ravnini

Sl.5.4 Prijenosna krivulja poniranja

Sl.5.5 Prijenosna krivulja posrtanja

Sl. 5.6 Prijenosne krivulje poniranja za različite susretne kuteve

Sl. 5.7 Prijenosne krivulje posrtanja za različite susretne kuteve

Sl.6.1 Zajednički dijagram poniranja

Sl. 6.2 Zajednički dijagram posrtanja

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Forma broda

Tablica 2.2 Raspored masa po duljini

Tablica 3.1 Bezdimenzionalni hidrodinamički koeficijenti ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.2 Dimenzionalni koeficijenti ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.3 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata i sila za poniranje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.4 Dimenzionalni koeficijenti spregnutog poniranja i posrtanja ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.5 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata i sila za spregnuto poniranje i posrtanje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.6 Dimenzionalni koeficijenti za posrtanje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.7 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata za posrtanje
($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

Tablica 3.8

Tablica 4.1 Sile

Tablica 4.2 Podaci za crtanje prijenosne krivulje

Tablica 5.1 Podaci za crtanje prijenosne krivulje poniranja

Tablica 5.2 Podaci za crtanje prijenosne krivulje posrtanja

POPIS OZNAKA

$a(x)$ - poluširina vodne linije , m

a_0 – poluširina vodne linije na sredini volumena, m

a_{33} - bezdimenzijski koef. dodane mase

$b_0(x)$ - poluširina trupa (polumjer), m

b_{33} –bezdimenzijski koef. prigušenja

$d_0(x)$ – gaz, m

f_{3FK}, f_{3D} – bezdimenzionalni koeficijenti Froude-Krilovljeve i difrakcijske
komponente sile

g – gravitacija, m/s^2

k –valni broj, m^{-1}

m – masa, kg

m_{0x} – moment tromosti oko osi x, m^4

m_{0z} – moment tromosti oko osi z, m^4

n - prigušenje

z_B – težište istisnine, m

x_B – težište istisnine, m

x_0 - udaljenost presjeka od težišta istisnine, m

$A(x)$ - površina presjeka, m^2

$[A_{jk}]$ - matrica pridruženih masa

A_{VL} – površina vodne linije, m^2

B – širina, m

$[C_{jk}]$ - matrica krutosti

$C_A(x)$ – koeficijent punoće presjeka

$F(t)$ – sila, N

I_{ij} – moment tromosti mase

L – duljina vodne linije, m

M_Q – moment, tm

$[M_{jk}]$ - matrica masa

α, β – zadani parametri forme

δ - pomak

ε_j - fazni pomak j-tog gibanja

ρ – gustoća, t/m³

η_j - j-ti oblik gibanja broda

ω - frekvencija, s⁻¹

ζ_a - amplituda vala, m

Izjavlujem da sam završni rad izradila samostalno.

1 SAŽETAK

Prvi dio zadatka napravljen je u sklopu kolegija Osnovne teorije pomorstvenosti: proračun prijenosne krivulje po strip metodi korištenjem koeficijenata hidrodinamičkih reakcija i uzbuda za polukružne forme. Zadatak završnog rada je provjeriti dobivene rezultate koristeći WAVESHIP- jedan od programa koji dolazi u sklopu programskog paketa SESAM, razvijenog u Det Norske Veritasu.

2 ODREĐIVANJE HIDRODINAMIČKIH ZNAČAJKI TRUPA

Za zadanu formu treba odrediti hidrodinamičke značajke trupa za poniranje i posrtanje za valove u pramac ($\beta=180^\circ$), brod miruje ($v = 0$ m/s) i jediničnu valnu amplitudu ($\zeta_a = 1$ m), trup je podijeljen na 10 elemenata duljine 10,8 m. Jednadžba forme glasi :

$$a(x) = a_0 \left[1 - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]^\alpha \left[1 - \beta \left(\frac{x}{l} \right) \right].$$

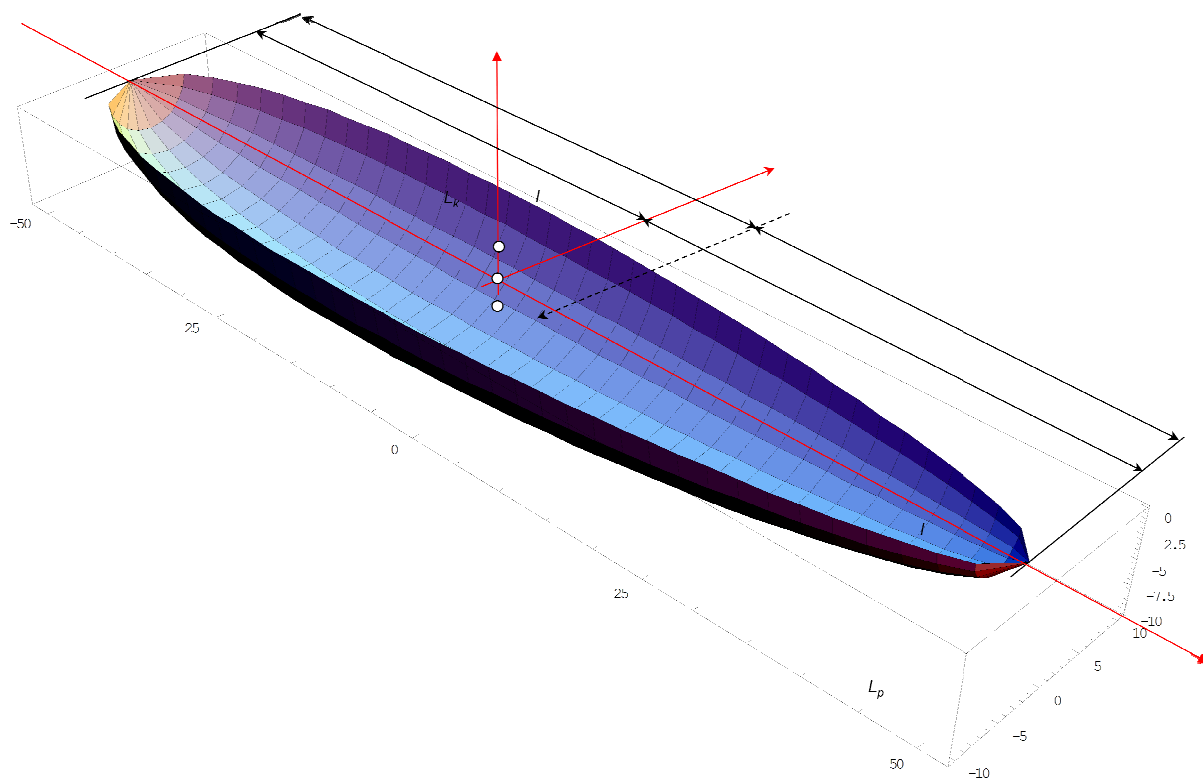
Gdje su : a_0 – poluširina vodne linije na sredini volumena, $a_0 = 10,8$ m

L – duljina vodne linije, $2l = L = 108,0$ m

α, β – zadani parametri forme : $\alpha = 0,45$

$\beta = 0,25$.

Sl.2.1 Forma određena iz jednadžbe i duljine broda



Ostale karakteristike : $B = 21,6$ m

$T = 10,8$ m .

Hidrostatički podaci: $V = 13577,7$ m³ volumen

$A_{VL} = 1868,6$ m² površina vodne linije

$$m_{0x} = -76374,3 \text{ m}^4$$

$$m_{0z} = -57096 \text{ m}^4$$

$$x_B = -5,625 \text{ m}$$

$$z_B = -4,205 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho = 1,0 \text{ t/m}^3.$$

Prvo je potrebno odrediti geometrijski opis trupa i raspored masa broda, u Tablici 2.1 opisana je forma : x - udaljenost presjeka od sredine broda

x_0 - udaljenost presjeka od težišta istisnine

$b_0(x)$ - poluširina trupa (polumjer)

$B_0(x)$ - širina trupa

$d_0(x)$ - gaz

$A(x)$ - površina presjeka

$C_A(x)$ – koeficijent punoće presjeka

Tablica 2.1 Forma broda

n	x	x1	$b_0(x)$	$d_0(x)$	$B(x)$	$A(x)$	$C_A(x)$	$\sqrt{\frac{b_0}{g}}$
	m	m	m	m	m	m^2		
0	-54,000	-48,375	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
1	-40,500	-34,875	8,841	8,841	17,682	122,776	0,785	0,949
2	-27,000	-21,375	10,675	10,675	21,349	178,990	0,785	1,043
3	-13,500	-7,875	11,147	11,147	22,293	195,164	0,785	1,066
4	0,000	5,625	10,800	10,800	21,600	183,218	0,785	1,049
5	13,500	19,125	9,835	9,835	19,670	151,944	0,785	1,001
6	27,000	32,625	8,303	8,303	16,605	108,278	0,785	0,920
7	40,500	46,125	6,049	6,049	12,098	57,477	0,785	0,785
8	54,000	59,625	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00

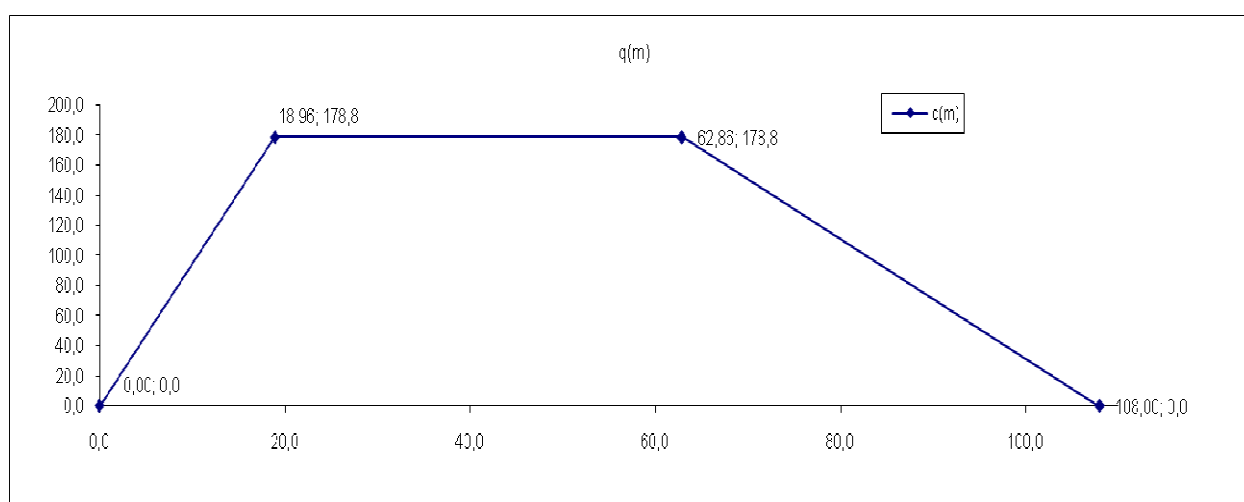
Iz zadanih podataka broda mogli smo izračunati silu i moment kojom tekućina djeluje na brod u valu uslijed djelovanja tlakova (zbog linearne teorije se zanemaruje kvadratni član Bernoullijeve jednadžbe) na oplakanu površinu. U Excelu smo koristili *solver*, alat koji nalazi optimalnu vrijednost više međusobno

povezanih varijabli čiji je račun složen. U ovom slučaju tražili smo duljine krmenog (l_1) i pramčanog (l_2) kraja i veličinu kontinuiranog opterećenja uz uvjet da sila i moment ostanu nepromijenjeni i da zbroj krmenog i pramčanog kraja bude manji od ukupne duljine broda. S l_1 i l_2 dalje nalazimo moment tromosti I_{55} i polumjer tromosti r_{55} . [1]

Tablica 2.2 Raspored masa po duljini

$l_1 =$	18,956 m	$x(m)$	$s(m)$	$q(x) (t/m)$
$l_2 =$	45,138 m	0,00	0,00	0,0
$q =$	178,764 t m ⁻¹	18,96	18,96	178,8
$Q =$	13577,7 t	62,86	81,82	178,8
$M_Q =$	-76374,6 t m	108,00	108,00	0,0

SI 2.2 Raspored masa po duljini



3 PRIJENOSNA KRIVULJA PONIRANJA I POSRTANJA NA HARMONIJSKOM VALU

Dinamička jednačba ravnoteže kod harmonijske sile uzbude glasi

$$m\ddot{x} + n\dot{x} + kx = F(t),$$

a za brod na harmonijskom valu u matričnom obliku

$$\underbrace{([M]_{jk} + [A]_{jk})}_{\text{inercijske sile}} \{\ddot{\delta}_j\} + \underbrace{[B]_{jk}}_{\text{prigušne sile}} \{\dot{\delta}_j\} + \underbrace{[C]_{jk}}_{\text{povratne sile}} \{\delta_j\} = \underbrace{\zeta_a (\text{Re}\{F_j\} e^{-i\omega t})}_{\text{uzbudna sila}}.$$

[M] - matrica masa i momenata tromosti masa broda

[A] - matrica pridruženik masa

[B] - koef. hidrodinamičkog prigušenja

[C] - koef. krutosti povratnih sila

δ_j - harmonijski - pomak broda $\delta_j(t) = \text{Re}\{\eta_j \cdot e^{-i\omega t}\}$

- brzina $\dot{\delta}_j(t) = \text{Re}\{-i\omega\eta_j \cdot e^{-i\omega t}\}$

- ubrzanje $\ddot{\delta}_j(t) = \text{Re}\{-\omega^2\eta_j \cdot e^{-i\omega t}\}$

Jednačba prelazi u oblik

$$([C]_{jk} - \omega^2([M]_{jk} + [A]_{jk}) - i\omega[B]_{jk})\{\eta_j\} = \zeta_a \{F_j\}.$$

Brod ima 6 stupnjeva slobode gibanja i indeks j obilježava gibanje o kojem se radi, $j=1,2,3$ su translacijska, $j=4,5,6$ rotacijska gibanja

- η_1 zalijetanje
- η_2 zanošenje
- η_3 poniranje

- η_4 ljuľanje
- η_5 posrtanje
- η_6 zaošľanje .

Morski val se definira izrazom

$$\zeta = \zeta_a \cos(\omega t + kx) ,$$

ζ_a je amplituda vala.

Brodski trup ima izraženu dimenziju duljine u odnosu na širinu i gaz i ako trup presječemo nizom presjeka konačne duljine (vrpci)i svaki presjek promatramo kao beskonačno dugačak cilindar, strujanje u smjeru x osi možemo zanemariti (brzina v_x mora biti što manja za točnije rezultate) [2].

Pretpostavljamo da je promjena forme monotona, brzina napredovanja mala u odnosu na frekvenciju njihanja i zanemarujemo utjecaj krajeva. Opisana metoda se zbog *vrpci* kojima je zamijenjen trup naziva vrpčasta metoda.

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_{55} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{33}^0(\omega) & A_{35}^0(\omega) \\ A_{53}^0(\omega) & A_{55}^0(\omega) \end{bmatrix} \right) - i\omega \begin{bmatrix} B_{33}^0(\omega) & B_{35}^0(\omega) \\ B_{53}^0(\omega) & B_{55}^0(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{Bmatrix} = \zeta_a \begin{Bmatrix} F_3(\omega) \\ F_5(\omega) \end{Bmatrix}$$

$$a_{33}(kd_0) = \alpha(kd_0) \rho A(x) \quad \alpha(kd_0) - \text{bezdimenzijski koef. dodane mase}$$

$$b_{33}(kd_0) = \beta(kd_0) \rho A(x) \sqrt{\frac{g}{b_0}}$$

$$A_{33}^0 = \int_L a_{33} dx$$

$$B_{33}^0 = \int_L b_{33} dx$$

$$C_{33} = \rho g \int_L B(x) dx$$

$$A_{35}^0 = A_{53}^0 = - \int_L x a_{33} dx$$

$$B_{35}^0 = B_{53}^0 = - \int_L x b_{33} dx$$

$$C_{35} = C_{53} = - \rho g \int_L B(x) x dx$$

$$A_{55}^0 = \int_L x^2 a_{33} dx$$

$$B_{55}^0 = \int_L x^2 b_{33} dx$$

$$C_{55} = \rho g \int_L x^2 B(x) dx$$

A_{33} , B_{33} , C_{33} – koef. pridružene mase, prigušenja i krutosti za poniranje

A_{35} , B_{35} , C_{35} – koef. za spregnuto poniranje i posrtanje

A_{55} , B_{55} , C_{55} – koef. za posrtanje

$$F_3 = \int_L (f_{3FK} + f_{3D}) dx$$

$$F_5 = \int_L x(f_{3FK} + f_{3D}) dx$$

f_{3FK}, f_{3D} – bezdimenzionalni koeficijenti Froude-Krilovljeve i difrakcijske komponente sile

Integracijom gornjih izraza dobiveni su ukupni iznosi sila i koeficijenata (u proračunu je korištena Simpsonova metoda određivanja površine) pomoću kojih možemo izračunati amplitude poniranja i posrtanja, η_{a3} i η_{a5} , i konačno vrijednost prijenosne funkcije .

Prikazan je slijed računanja za $\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$.

Tablica 3.1 Bezdimenzionalni hidrodinamički koeficijenti ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

$k_e d_0$	Hidrodin. reakcija		Hidrodinamička uzbuđa					
	$\alpha_{33}(k_e d_0)$	$\beta_{33}(k_e d_0)$	$\varphi_{3c}(k_e d_0)$	$\varphi_{3s}(k_e d_0)$	$\delta_{3c}(k_e d_0)$	$\delta_{3s}(k_e d_0)$	$\cos(k_e \xi)$	$\sin(k_e \xi)$
	-	-	-		-		-	-
0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9939	0,1107
0,019	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9963	0,0861
0,023	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9981	0,0614
0,025	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9993	0,0366
0,026	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9999	0,0119
0,025	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9999	-0,0129
0,023	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9993	-0,0377
0,021	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9981	-0,0624
0,017	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9962	-0,0871
0,013	2,5618	0,1869	0,9922	0,0000	-0,0256	0,0187	0,9937	-0,1118
0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tablica 3.2 Dimenzionalni koeficijenti ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	$\Delta x_{n-1, n}$	Hidrodin. reakcija		Hidrodinamička uzbuđa				
		$a_{33}(k_e d_0)$	$b_{33}(k_e d_0)$	c_{33}	$f_{3C}(k_e d_0)$	$f_{3S}(k_e d_0)$	$d_{3C}(k_e d_0)$	$d_{3S}(k_e d_0)$
					$\cdot \cos(k_e \xi)$	$\cdot \sin(k_e \xi)$	$\cdot \cos(k_e \xi)$	$\cdot \sin(k_e \xi)$
		$t \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ s m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$
0	10,80	0	0	0	0	0	0	0
1	10,80	269,5	21,5	160,6	158,7	0,0	-4,1	0,3
2	10,80	415,4	29,8	199,3	197,4	0,0	-5,1	0,2
3	10,80	485,5	33,5	215,5	213,7	0,0	-5,5	0,1
4	10,80	498,8	34,2	218,4	216,7	0,0	-5,6	0,0
5	10,80	469,4	32,6	211,9	210,2	0,0	-5,4	-0,1
6	10,80	408,3	29,4	197,6	196,0	0,0	-5,1	-0,1
7	10,80	325,0	24,8	176,3	174,6	0,0	-4,5	-0,2
8	10,80	226,9	18,9	147,3	145,6	0,0	-3,8	-0,2
9	10,80	119,8	11,7	107,0	105,5	0,0	-2,7	-0,2
10	10,80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tablica 3.3 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata i sila za poniranje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	koef. x ->	$a_{33}(k_e d_0)$	$b_{33}(k_e d_0)$	c_{33}	$f_{3C}(k_e d_0)$	$f_{3S}(k_e d_0)$	$d_{3C}(k_e d_0)$	$d_{3S}(k_e d_0)$
		$t \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ s m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$
0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	14,4	3880,8	310,0	2312,1	2285,5	0,0	-59,0	3,7
2	7,2	2991,0	214,4	1435,3	1421,4	0,0	-36,7	1,6
3	14,4	6990,7	482,0	3103,2	3076,9	0,0	-79,4	2,1
4	7,2	3591,5	246,0	1572,8	1560,4	0,0	-40,3	0,3
5	14,4	6759,0	470,0	3051,3	3027,3	0,0	-78,1	-0,7
6	7,2	2940,0	211,7	1423,0	1410,9	0,0	-36,4	-1,0
7	14,4	4679,7	356,7	2538,9	2514,2	0,0	-64,9	-3,0
8	7,2	1634,0	136,3	1060,9	1048,6	0,0	-27,1	-1,7
9	14,4	1724,8	168,7	1541,4	1519,8	0,0	-39,2	-3,2
10	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	$A_{33}(\omega_e)$	$B_{33}(\omega_e)$	C_{33}	$F_{3C}^{FK}(\omega_e)$	$F_{3S}^{FK}(\omega_e)$	$F_{3C}^D(\omega_e)$	$F_{3S}^D(\omega_e)$
	t	$kN \text{ s m}^{-1}$	$kN \text{ m}^{-1}$	kN	kN	kN	kN
Sume	35.191,3	2.595,9	18.038,8	17.864,9	0,0	-460,9	-1,8

Oznaka FK označava Froude–Krilovljevu komponentu sile, D označava difrakcijsku komponentu, C -kosinusni član, S –sinusni član kompleksnog zapisa.

Tablica 3.4 Dimenzionalni koeficijenti spregnutog poniranja i posrtanja
($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	- x $a_{33}(k_e d_0)$	- x $b_{33}(k_e d_0)$	- x c_{33}	x $f_{3c}(k_e d_0)$	x $f_{3s}(k_e d_0)$	x $d_{3c}(k_e d_0)$	x $d_{3s}(k_e d_0)$
	$tm \text{ m}^{-1}$	$kNm \text{ s m}^{-2}$	$kNm \text{ m}^{-2}$				
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	10126,4	808,9	6033,1	-5963,8	0,0	153,9	-9,7
2	11122,6	797,4	5337,4	-5285,8	0,0	136,4	-6,1
3	7755,3	534,8	3442,6	-3413,4	0,0	88,1	-2,4
4	2581,4	176,8	1130,4	-1121,5	0,0	28,9	-0,3
5	-2640,2	-183,6	-1191,9	1182,5	0,0	-30,5	-0,3
6	-6706,8	-482,9	-3246,2	3218,6	0,0	-83,0	-2,3
7	-8847,6	-674,5	-4800,2	4753,5	0,0	-122,6	-5,6
8	-8629,6	-719,6	-5602,6	5537,8	0,0	-142,9	-9,1
9	-5848,1	-572,2	-5226,3	5153,0	0,0	-133,0	-10,9
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tablica 3.5 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata i sila za
spregnuto poniranje i posrtanje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	koef. x ->	$xa_{33}(k_e d_0)$	$xb_{33}(k_e d_0)$	x c_{33}	$xf_{3c}(k_e d_0)$	x $f_{3s}(k_e d_0)$	$xd_{3c}(k_e d_0)$	$xd_{3s}(k_e d_0)$
		$t \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ s m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-2}$				
0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	14,4	145819,5	11648,7	86876,4	-85878,8	0,0	2215,8	-139,8
2	7,2	80082,8	5741,4	38429,4	-38057,8	0,0	981,9	-44,1
3	14,4	111675,9	7700,6	49572,9	-49153,2	0,0	1268,2	-34,0
4	7,2	18586,0	1272,9	8139,1	-8075,1	0,0	208,3	-1,8
5	14,4	-38019,3	-2643,8	-17163,6	17028,3	0,0	-439,4	-4,1
6	7,2	-48289,0	-3476,9	-23372,6	23173,8	0,0	-597,9	-16,5
7	14,4	-127404,9	-9712,3	-69122,8	68450,0	0,0	-1766,1	-80,7
8	7,2	-62132,8	-5181,3	-40338,9	39872,2	0,0	-1028,8	-65,7
9	14,4	-84212,5	-8239,2	-75258,2	74203,4	0,0	-1914,5	-157,3
10	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	$A_{35}(\omega_e)$	$B_{35}(\omega_e)$	C_{35}	$F_{35c}^{FK}(\omega_e)$	$F_{35s}^{FK}(\omega_e)$	$F_{35c}^D(\omega_e)$	$F_{35s}^D(\omega_e)$
Sume	-3.894,4	-2.890,0	-42.238,2	41.562,8	0,0	-1.072,4	-543,9

Tablica 3.6 Dimenzionalni koeficijenti za posrtanje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	$x^2 a_{33}(k_e d_0)$	$x^2 b_{33}(k_e d_0)$	$x^2 c_{33}$
	$tm \text{ m}^{-1}$	$kNm \text{ s m}^{-2}$	$kNm \text{ m}^{-2}$
0	0,0	0,0	0,0
1	380497,8	30395,9	226693,0
2	297807,8	21351,0	142909,3
3	123890,5	8542,8	54995,0
4	13358,7	914,9	5850,0
5	14851,3	1032,7	6704,5
6	110159,4	7931,8	53318,7
7	240874,9	18362,4	130685,3
8	328138,9	27364,0	213040,0
9	285532,9	27936,0	255172,2
10	0,0	0,0	0,0

Tablica 3.7 Integracija po duljini i ukupna vrijednost koeficijenata za posrtanje ($\omega = 0,15 \text{ s}^{-1}$)

n	koef. $x \rightarrow$	$x^2 a_{33}(k_e d_0)$	$x^2 b_{33}(k_e d_0)$	$x^2 c_{33}$
		$t \text{ m}^{-1}$	$kN \text{ s m}^{-2}$	$kN \text{ m}^{-2}$
0	3,6	0,0	0,0	0,0
1	14,4	5479167,8	437701,1	3264379,2
2	7,2	2144215,9	153727,2	1028947,1
3	14,4	1784022,6	123016,4	791927,4
4	7,2	96182,3	6587,4	42119,9
5	14,4	213858,7	14871,3	96545,1
6	7,2	793147,5	57108,8	383894,3
7	14,4	3468598,5	264418,4	1881868,3
8	7,2	2362599,8	197020,7	1533887,9
9	14,4	4111673,4	402278,9	3674479,8
10	3,6	0,0	0,0	0,0

	$A_{55}(\omega_e)$	$B_{55}(\omega_e)$	C_{55}
Sume	20.453.466,5	1.656.730,3	12.698.048,9

Sume koeficijenata i sila se uvrštavaju u matičnu jednadžbu dinamičke ravnoteže iz koje se tada dobiva amplitudu odziva. Amplituda odziva računa se za raspon frekvencija od $0,15 \text{ s}^{-1}$ do 3 s^{-1} . Prijenosna krivulja se računa po formuli

$$|H(i\omega)| = \frac{\eta_{aj}}{\zeta_a},$$

$\zeta_a = 1 \text{ m}$ (zadano). Za translacijska gibanja, prijenosna krivulja je bezdimenzionalna veličina, dok se za rotacijska treba podijeliti s valnim brojem k da bi se postigla bezdimenzionalnost.

U tablici 3.8 nalaze se odzivne amplitude poniranja, posrtanja i fazni pomaci za frekvencije od $0,15 \text{ s}^{-1}$ do 3 s^{-1} .

Tablica 3.8

ω_e	η_{3X}	$\eta_{3\Sigma}$	η_{5C}	η_{5S}	k	η_{3A}	ε_3	η_{5A}	ε_5	$\eta_{5A}/(k\zeta_a)$
0,150	1,027	0,024	0,000	0,000	0,002	1,028	0,023	0,000	0,612	0,133
0,200	1,035	0,035	0,000	0,000	0,004	1,035	0,034	0,000	1,436	0,078
0,250	1,077	0,049	0,001	0,001	0,006	1,078	0,045	0,001	0,954	0,137
0,300	1,099	0,068	0,001	0,001	0,009	1,101	0,062	0,002	0,984	0,190
0,350	0,994	0,139	0,001	0,003	0,012	1,004	0,139	0,003	1,260	0,252
0,400	0,930	0,183	0,002	0,004	0,016	0,948	0,194	0,005	1,227	0,280
0,450	0,863	0,221	0,001	0,008	0,021	0,891	0,251	0,008	1,445	0,369
0,500	0,748	0,250	0,000	0,011	0,025	0,789	0,323	0,011	-1,552	0,432
0,550	0,657	0,277	0,000	0,017	0,031	0,713	0,398	0,017	-1,549	0,548
0,600	0,455	0,295	-0,008	0,024	0,037	0,542	0,575	0,025	-1,247	0,677
0,650	0,290	0,262	-0,017	0,027	0,043	0,391	0,735	0,031	-1,019	0,731
0,700	0,058	0,118	-0,033	0,017	0,050	0,132	1,113	0,037	-0,462	0,741
0,750	-0,007	-0,012	-0,031	0,002	0,057	0,014	1,075	0,031	-0,051	0,549
0,800	-0,105	-0,131	-0,020	-0,006	0,065	0,168	0,894	0,021	0,271	0,320
0,850	-0,095	-0,146	-0,009	-0,007	0,074	0,174	0,995	0,011	0,628	0,151
0,900	-0,149	-0,249	-0,004	-0,003	0,083	0,290	1,031	0,005	0,577	0,060
0,950	-0,092	-0,234	0,000	-0,001	0,092	0,251	1,198	0,001	-1,035	0,007
1,000	-0,015	-0,180	0,001	0,001	0,102	0,181	1,486	0,002	1,024	0,015
1,050	0,014	-0,068	0,002	0,002	0,112	0,069	-1,374	0,002	0,760	0,022
1,250	-0,017	0,039	0,000	0,000	0,159	0,042	-1,154	0,000	0,543	0,000
1,500	0,000	-0,013	0,000	0,000	0,229	0,013	1,551	0,000	-0,587	0,001
1,750	0,002	0,007	0,000	0,000	0,312	0,007	1,255	0,000	-0,412	0,000
2,000	-0,003	0,003	0,000	0,000	0,408	0,004	-0,723	0,000	1,084	0,000
2,500	0,004	0,001	0,000	0,000	0,637	0,004	0,339	0,000	0,962	0,000
2,750	0,001	0,000	0,000	0,000	0,771	0,001	0,112	0,000	1,208	0,000
3,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,917	0,001	-0,870	0,000	0,967	0,000

Treba napomenuti da vektori pomaka i sile imaju realni i imaginarni član te se nakon izjednačavanja imaginarnih i realnih dijelova jednačbe dobiva sustav od četiri jednačbe s četiri nepoznanice η_{3c} , η_{3s} , η_{5c} i η_{5s} .

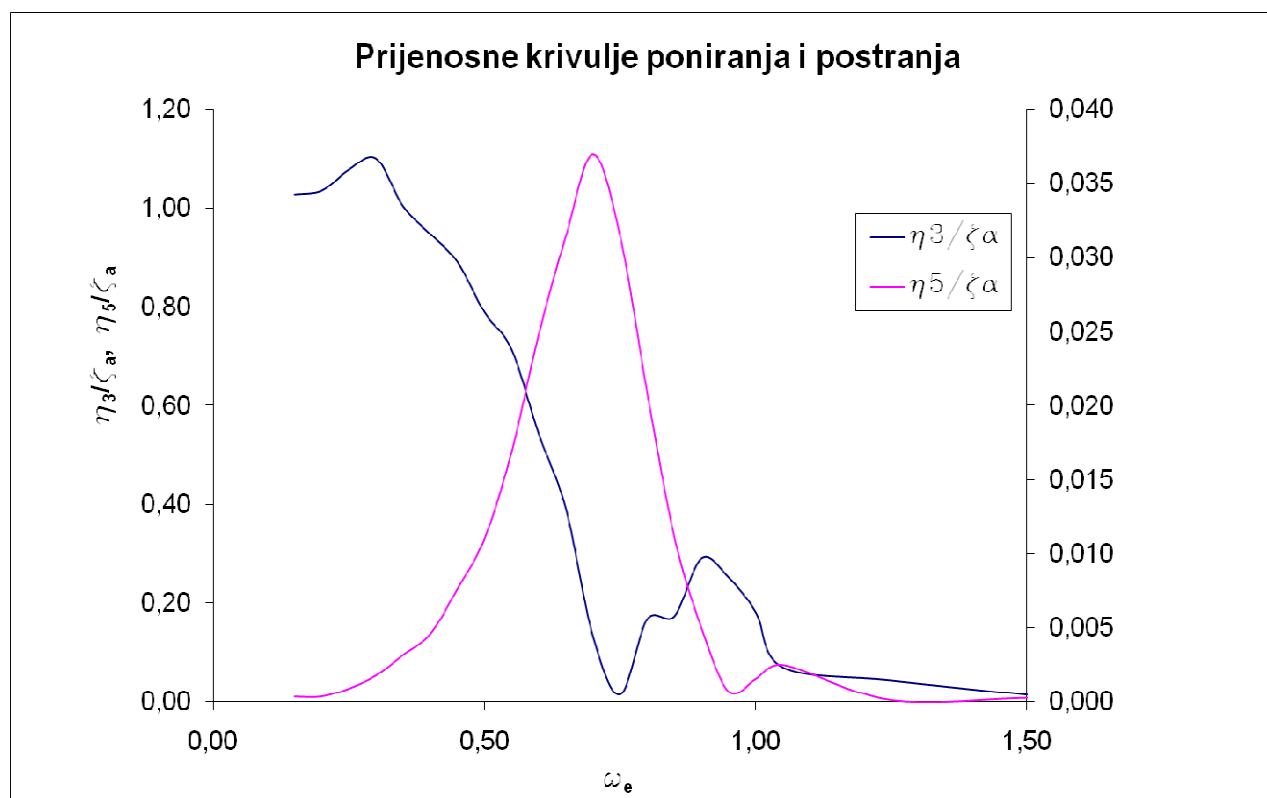
$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad - \text{valni broj}$$

$$\eta_{jA} = \sqrt{\eta_{jC}^2 + \eta_{jS}^2} \quad - \text{amplituda poniranja}$$

$$\varepsilon_j = \arctg \frac{\eta_{jS}}{\eta_{jC}} \quad - \text{fazni pomak}$$

Iz dijagrama možemo vidjeti kako su vrijednosti prijenosne krivulje posrtanja puno manje od vrijednosti prijenosne krivulje poniranja jer brod miruje što će se odraziti na visinu odziva vala posrtanja.

Sl. 3.1 Prijenosne krivulje poniranja i posrtanja



4 UZBUDA NA HARMONIJSKOM DUGAČKOM VALU

Strip metoda ne daje dobre rezultate za posrtanje broda jer promatrano tijelo ne napreduje. Zato, da bi dobili bolji uvid u odziv broda kod posrtanja, izvršiti ćemo određivanje odziva broda na harmonijskom dugačkom valu.

Brod koji napreduje, često ima različiti valni broj i frekvenciju njihanja od valnih i zato se određuje efektivna frekvencija sustava (ovisi o susretnom kutu β i brzini napredovanja) i efektivni valni broj (β). Zadan je brod s kutem $\beta=180^\circ$, tj. valovima u pramac i $v=0$.

Pretpostavljamo da je brod uzak ($B \ll 1$) pa zapis vala izgleda

$$\zeta(x, z; t) = \zeta_a e^{kz} \cos(kx - \omega t)$$

$$\text{gdje je } z = z(x) = T(x) \text{ gaz} \quad T(x) = -\frac{A(x)}{2d_0(x)}$$

$A(x)$ je površina presjeka, $d_0(x)$ poluširina presjeka.

Uzbudna sila poniranja se može izraziti

$$dF_3 = \rho g 2d_0(x) dx \cdot \zeta(x, z; t) = 2\rho g \zeta_a \cdot e^{-kz} \cos(kx - \omega t) d_0(x) dx$$

Integriranjem gornjeg izraza dobiva se

$$F_3(t) = 2\rho g \zeta_a \left[\int_L d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \cdot \cos kx \cdot dx \cdot \cos \omega t + \int_L d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \cdot \sin kx dx \cdot \sin \omega t \right]$$

$F_3(t) = 2\rho g \zeta_a [f_3^C \cos \omega t + f_3^S \sin \omega t]$ f_3^C, f_3^S su kosinusni i sinusni član uzbude poniranja:

$$f_3^C = \int_L d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \cos kx \cdot dx$$

$$f_3^S = \int_L d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \sin kx \cdot dx$$

Uzbudna sila posrtanja izražava se

$$dF_5 = \rho g 2d_0(x) \cdot x \cdot dx \cdot \zeta(x, z; t) = 2\rho g \zeta_a \cdot e^{-kz} \cos(kx - \omega t) d_0(x) \cdot x \cdot dx$$

Nakon integracije i sređivanja dobiva se

$$F_5(t) = 2\rho g \zeta_a [f_5^C \cos \omega t + f_5^S \sin \omega t],$$

a kosinusni i sinusni član uzbude posrtanja

$$f_5^C = \int_L x \cdot d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \cos kx \cdot dx$$

$$f_5^S = \int_L x \cdot d_0(x) \cdot e^{-kT(x)} \sin kx \cdot dx$$

Dalje se uz poznate uzbudne sile i od prije poznate koeficijente pridružene mase i koeficijente prigušenja dobiva po već opisanom postupku amplituda odziva poniranja i posrtanja uvrštavanjem poznatih podataka u matričnu jednadžbu dinamičke ravnoteže i rješavanja sustava dobivenih jednadžbi. U tablicama 4.1 i 4.2 nalaze podaci o iznosima sila za različite valne brojeve i pripadne frekvencije i o amplitudama odziva.

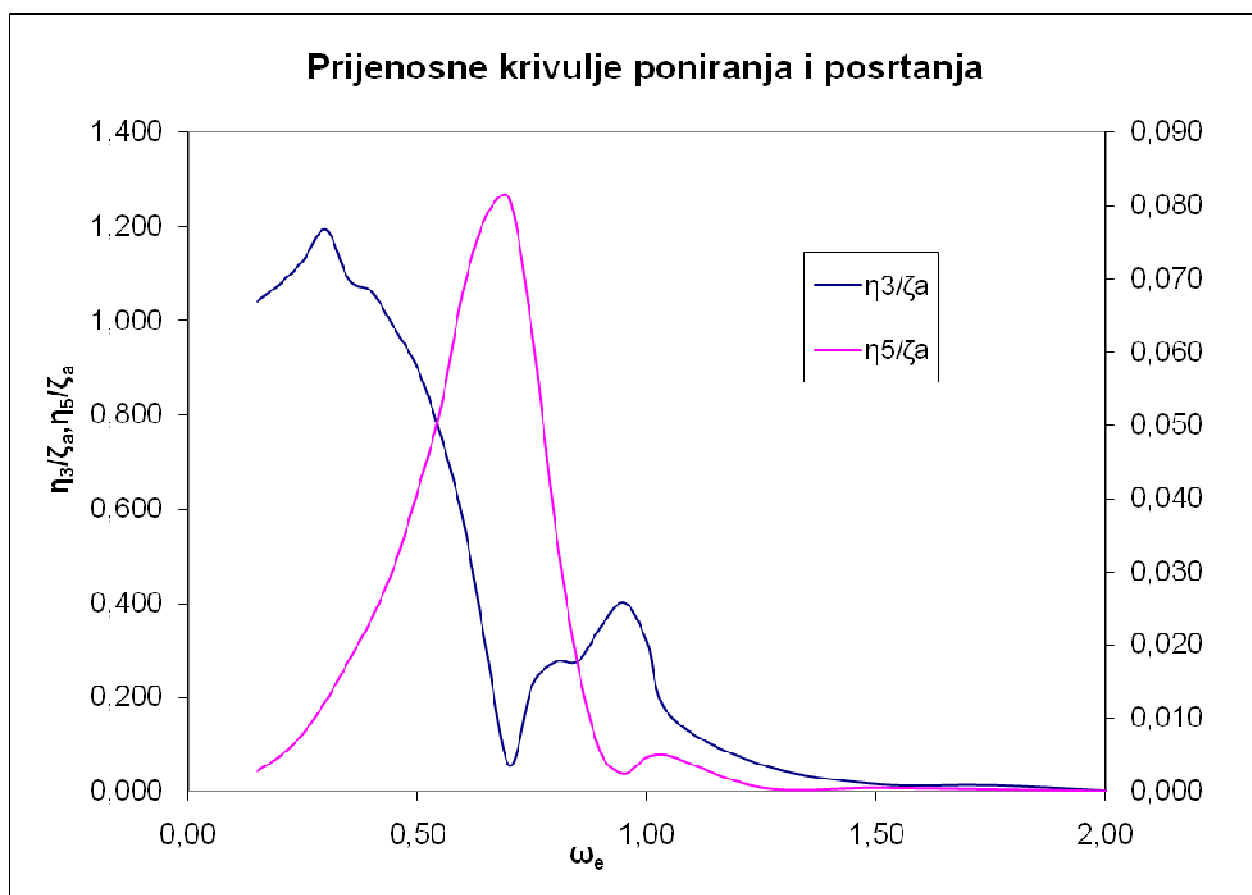
Tablica 4.1 Sile

ωe	k	f_3^C	f_3^S	f_5^C	f_5^S	F_3^C	F_3^S	F_5^C	F_5^S
0,15	0,00	902,10	-6,72	-2922,41	1471,88	17699,26	-131,82	-57337,72	28878,38
0,20	0,00	886,57	-11,65	-2834,90	2580,12	17394,43	-228,53	-55620,77	50622,04
0,25	0,01	864,06	-17,58	-2707,81	3950,72	16952,87	-344,89	-53127,22	77513,19
0,30	0,01	832,95	-24,17	-2532,78	5531,91	16342,41	-474,31	-49693,06	108535,98
0,35	0,01	791,55	-31,00	-2302,58	7250,05	15530,12	-608,22	-45176,63	142245,90
0,40	0,02	738,37	-37,53	-2013,00	9006,47	14486,91	-736,28	-39494,96	176707,01
0,45	0,02	672,45	-43,15	-1664,82	10676,72	13193,42	-846,69	-32663,80	209477,25
0,50	0,03	593,61	-47,25	-1265,84	12113,84	11646,70	-927,12	-24835,73	237673,51
0,55	0,03	502,91	-49,24	-832,21	13157,36	9867,08	-966,03	-16328,02	258147,50
0,60	0,04	402,86	-48,64	-388,86	13649,06	7904,06	-954,38	-7629,48	267794,58
0,65	0,04	297,62	-45,24	31,84	13455,50	5839,39	-887,67	624,61	263996,97
0,70	0,05	192,95	-39,13	393,36	12495,84	3785,65	-767,78	7717,74	245168,48
0,75	0,06	95,74	-30,79	660,46	10770,76	1878,40	-604,15	12958,32	211322,34
0,80	0,07	13,30	-21,09	806,12	8386,09	260,88	-413,80	15816,00	164535,00
0,85	0,07	-47,82	-11,19	818,68	5562,77	-938,19	-219,60	16062,55	109141,47
0,90	0,08	-83,13	-2,38	707,38	2624,56	-1630,99	-46,69	13878,85	51493,88
0,95	0,09	-91,53	4,21	503,76	-42,46	-1795,85	82,50	9883,83	-833,14
1,00	0,10	-76,15	7,84	257,41	-2058,41	-1493,97	153,75	5050,45	-40386,01
1,05	0,11	-44,33	8,42	25,54	-3136,41	-869,77	165,13	501,19	-61536,38
1,25	0,16	41,68	-1,97	-128,18	688,04	817,80	-38,71	-2514,83	13499,33
1,50	0,23	-23,57	-2,10	-51,97	-1218,50	-462,41	-41,29	-1019,65	-23906,88
1,75	0,31	33,15	3,58	121,92	1163,04	650,36	70,25	2392,11	22818,76
2,00	0,41	7,07	-2,68	78,55	-661,24	138,66	-52,67	1541,08	-12973,57
2,50	0,64	-3,45	3,78	-97,80	309,94	-67,67	74,11	-1918,87	6081,00
2,75	0,77	-0,78	1,66	-19,12	138,13	-15,25	32,63	-375,14	2710,18
3,00	0,92	-0,55	1,05	-17,94	70,19	-10,89	20,63	-351,89	1377,20

Tabilca 4.2 Podaci za crtanje prijenosne krivulje

ωe	η_{3C}	η_{3S}	η_{5C}	η_{5S}	k	η_{3A}	ϵ_3	η_{5A}	ϵ_5	$\eta_{5A}/(k\zeta_a)$
0,15	1,041	0,022	-0,001	0,003	0,002	1,041	0,022	0,003	-1,136	1,223
0,20	1,077	0,033	-0,001	0,005	0,004	1,078	0,031	0,005	-1,354	1,186
0,25	1,126	0,048	-0,001	0,008	0,006	1,127	0,043	0,008	-1,464	1,242
0,30	1,191	0,072	-0,001	0,012	0,009	1,193	0,060	0,012	-1,524	1,354
0,35	1,076	0,152	-0,002	0,018	0,012	1,087	0,140	0,018	-1,468	1,434
0,40	1,039	0,217	-0,002	0,024	0,016	1,061	0,206	0,024	-1,471	1,451
0,45	0,949	0,253	-0,006	0,030	0,021	0,982	0,261	0,031	-1,364	1,501
0,50	0,847	0,295	-0,012	0,039	0,025	0,897	0,335	0,041	-1,277	1,611
0,55	0,675	0,339	-0,020	0,048	0,031	0,756	0,465	0,052	-1,171	1,699
0,60	0,459	0,340	-0,039	0,056	0,037	0,571	0,638	0,069	-0,962	1,870
0,65	0,204	0,218	-0,061	0,050	0,043	0,298	0,819	0,079	-0,682	1,828
0,70	0,035	-0,042	-0,079	0,016	0,050	0,054	-0,879	0,081	-0,203	1,620
0,75	0,044	-0,221	-0,061	-0,014	0,057	0,225	-1,374	0,062	0,231	1,089
0,80	0,061	-0,268	-0,030	-0,020	0,065	0,275	-1,348	0,036	0,581	0,554
0,85	-0,016	-0,276	-0,012	-0,012	0,074	0,277	1,512	0,017	0,779	0,230
0,90	-0,077	-0,342	-0,004	-0,003	0,083	0,351	1,349	0,005	0,746	0,062
0,95	-0,029	-0,400	-0,001	0,002	0,092	0,401	1,497	0,002	-1,319	0,027
1,00	0,064	-0,310	0,000	0,005	0,102	0,317	-1,366	0,005	1,502	0,046
1,05	0,059	-0,149	0,001	0,005	0,112	0,160	-1,193	0,005	1,412	0,043
1,25	-0,053	0,018	0,000	-0,001	0,159	0,056	-0,319	0,001	-1,342	0,004
1,50	0,015	-0,001	0,000	0,001	0,229	0,015	-0,039	0,001	1,498	0,002
1,75	-0,013	-0,001	0,000	0,000	0,312	0,013	0,055	0,000	1,457	0,001
2,00	-0,002	0,001	0,000	0,000	0,408	0,002	-0,353	0,000	-1,470	0,000
2,50	0,001	-0,001	0,000	0,000	0,637	0,001	-0,831	0,000	-1,272	0,000
2,75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,771	0,000	-1,134	0,000	-1,437	0,000
3,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,917	0,000	-1,086	0,000	-1,324	0,000

Sl. 4.1 Prijenosne krivulje poniranja i posrtanja



5 PRORAČUN PONIRANJA I POSRTANJA POMOĆU PROGRAMA WAVESHIP

WAVESHIP je program koji služi hidrodinamčkoj analizi kod proračuna valnog opterećenja i odziva broda ili drugih pomorskih objekata fine forme na pravilnom valu. Program koristi strip metodu (2-dimenzionalno strujanje) kako bi se dobili koeficijenti dodane mase i prigušenja ovisni o frekvenciji.

Kod strip teorije se pretpostavlja da je susretna frekvencija veća od brzina napredovanja, da je duljina broda izražena u odnosu na gaz i širinu, monotona promjena poprečnog presjeka u uzdužnom smjeru i zanemaruju se rubovi. Zbog pretpostavke visokih frekvencija rezultati kod niskih frekvencija nisu dovoljno točni. Program nudi tri analize ovisno o složenosti i izlaznim podacima koji nas zanimaju. Za računanje prijenosnih krivulja poniranja i posrtanja koje se najčešće traže, koristi se druga "Global Response". Odziv se računa po strip teoriji Salvesena, Tucka i Faltisena, gdje se Haskindova relacija upotrebljava za direktno dobivanje sila uzbude iz potencijala radijacije.

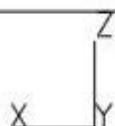
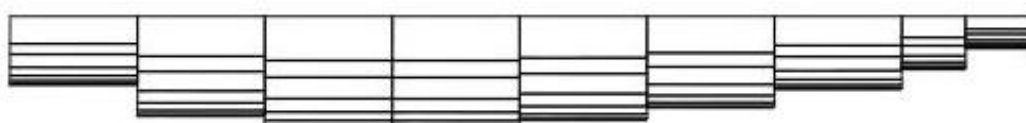
A_{jk} i B_{jk} za poniranje, zanošenje i ljuljanje se računa kao prisilno vibriranje u mirnoj vodi za svaki strip tako što se pretpostavi beskonačno dugačak cilindar oko kojeg je strujanje dvodimenzionalno[3].

Forma je podijeljena na 9 elemenata. Idući od pramčane okomice, strip 1 i 2 su duljine 6,75 m, a stripovi 3 do 9 duljine 13,5 m. Na polovici raspona svakog stripa zadane su y i z koordinate i opisana forma ima oblik prikazan slijedećim slikama.

Sl. 5.1 Projekcija forme u x - z ravnini

Sl. 5.2 Projekcija forme u x - y ravnini

Sl. 5.3 Projekcija forme u y - z ravnini



DATE 20-FEB-2009
TIME 10:44:08
SCALE 1: 300

YVIEW

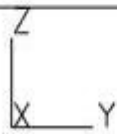
SESAM
PRESEL 7.4-02



ZVIEW

DATE 20-FEB-2009
TIME 10:44:33
SCALE 1: 300

SESAM
PRESEL 7.4-02



XVIEW

DATE 20-FEB-2009
TIME 10:45:06
SCALE 0.0136

SESAM
PRESEL 7.4-02

Izlazni podaci dani su u bezdimenzijskom obliku.

Tablica 5.1 Podaci za crtanje prijenosne krivulje poniranja

wl/l	wl	k	ω (s ⁻¹)	abs(x3)
0,23	24,84	0,25	1,58	0,0054
0,3	32,4	0,19	1,38	0,0134
0,38	41,04	0,15	1,23	0,032
0,49	52,92	0,12	1,08	0,0796
0,64	69,12	0,09	0,94	0,1757
0,82	88,56	0,07	0,83	0,2333
1,06	114,48	0,05	0,73	0,2317
1,37	147,96	0,04	0,65	0,4567
1,76	190,08	0,03	0,57	0,6535
2,28	246,24	0,03	0,50	0,7884
2,94	317,52	0,02	0,44	0,8738
3,79	409,32	0,02	0,39	0,9262
4,89	528,12	0,01	0,34	0,9572
6,31	681,48	0,01	0,30	0,9753
8,14	879,12	0,01	0,26	0,9859
10,49	1132,92	0,01	0,23	0,9919
13,54	1462,32	0,00	0,21	0,9954
17,47	1886,76	0,00	0,18	0,9974
22,53	2433,24	0,00	0,16	0,9985
29,07	3139,56	0,00	0,14	0,9992

Tablica 5.2 Podaci za crtanje prijenosne krivulje posrtanja

wl/l	abs(x5) bezdim.	abs(x5) dim.
0,040258	0,0094	0,0004
0,030864	0,0089	0,0003
0,024366	0,1232	0,0030
0,018896	0,4791	0,0091
0,014468	0,8991	0,0130
0,011292	2,5892	0,0292
0,008735	3,9337	0,0344
0,006759	4,8787	0,0330
0,005261	5,4974	0,0289
0,004061	5,8836	0,0239
0,003149	6,1188	0,0193
0,002443	6,2577	0,0153
0,001894	6,3384	0,0120
0,001467	6,3851	0,0094
0,001138	6,4114	0,0073
0,000883	6,4262	0,0057
0,000684	6,4343	0,0044
0,00053	6,4385	0,0034
0,000411	6,4406	0,0026

wl- valna duljina (λ)

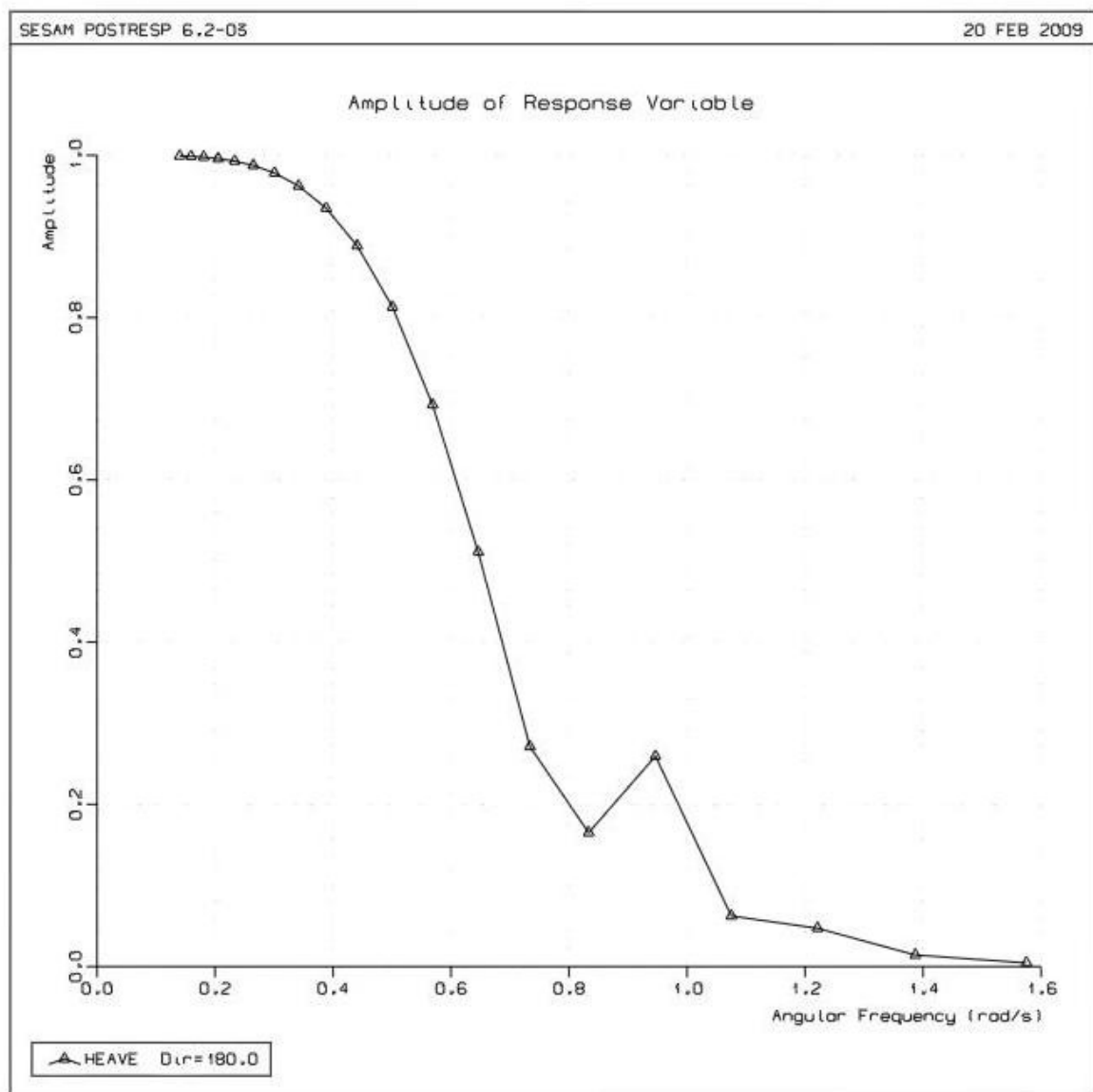
l - duljina broda (108 m)

k – valni broj

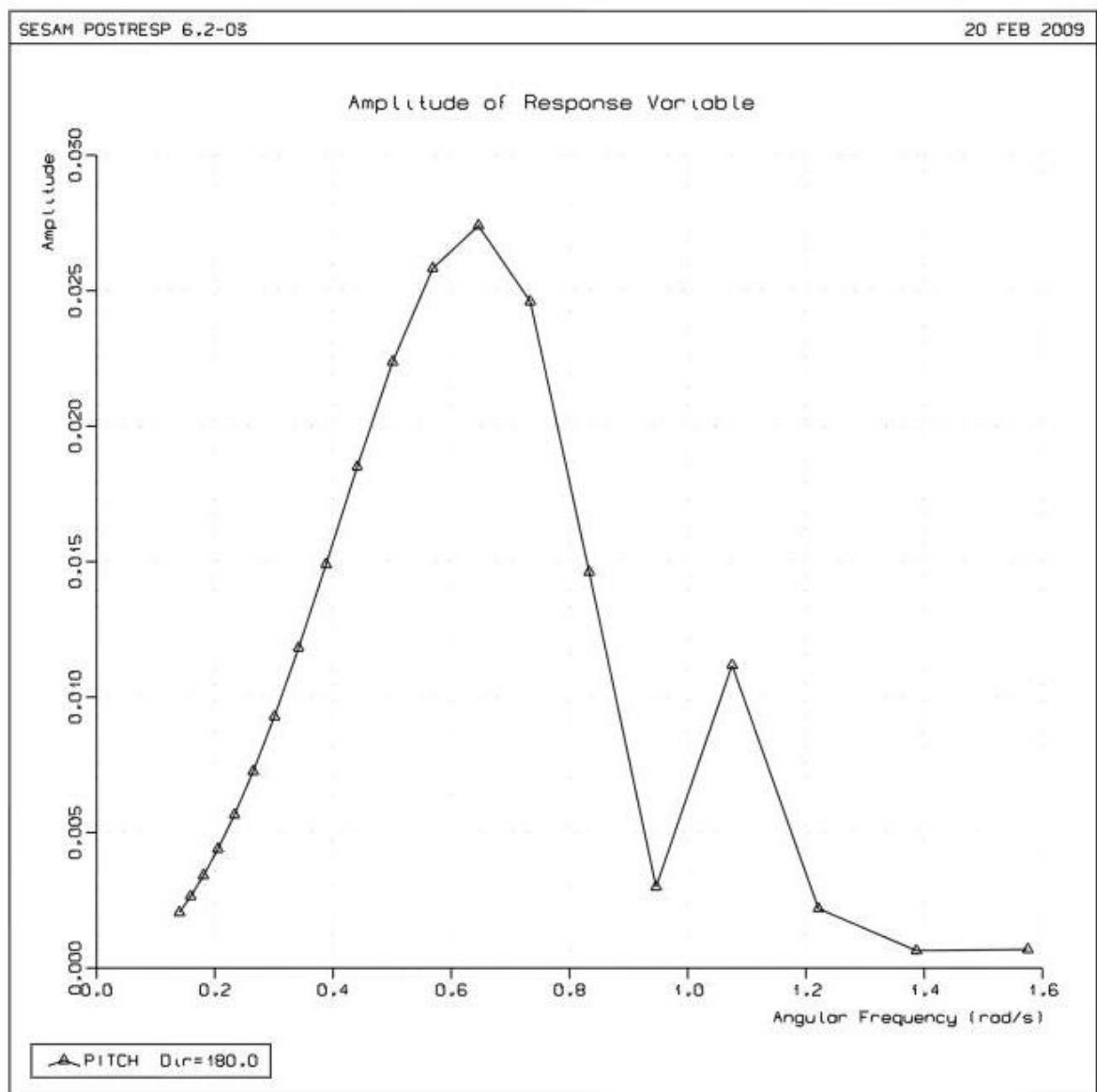
abs (x3) - odziv, poniranje

abs (x5) - odziv, posrtanje

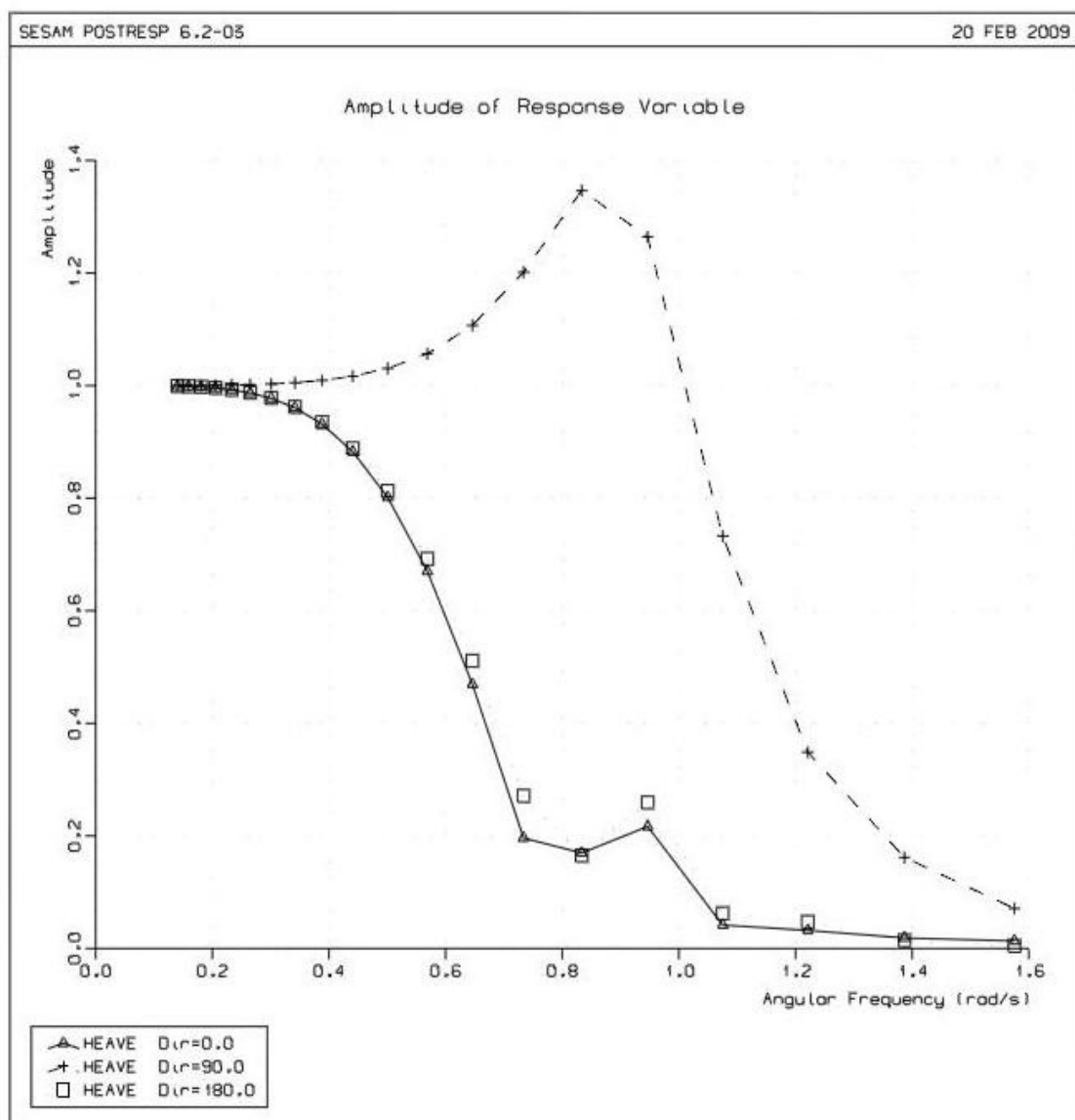
Sl.5.4 Prijenosna krivulja poniranja



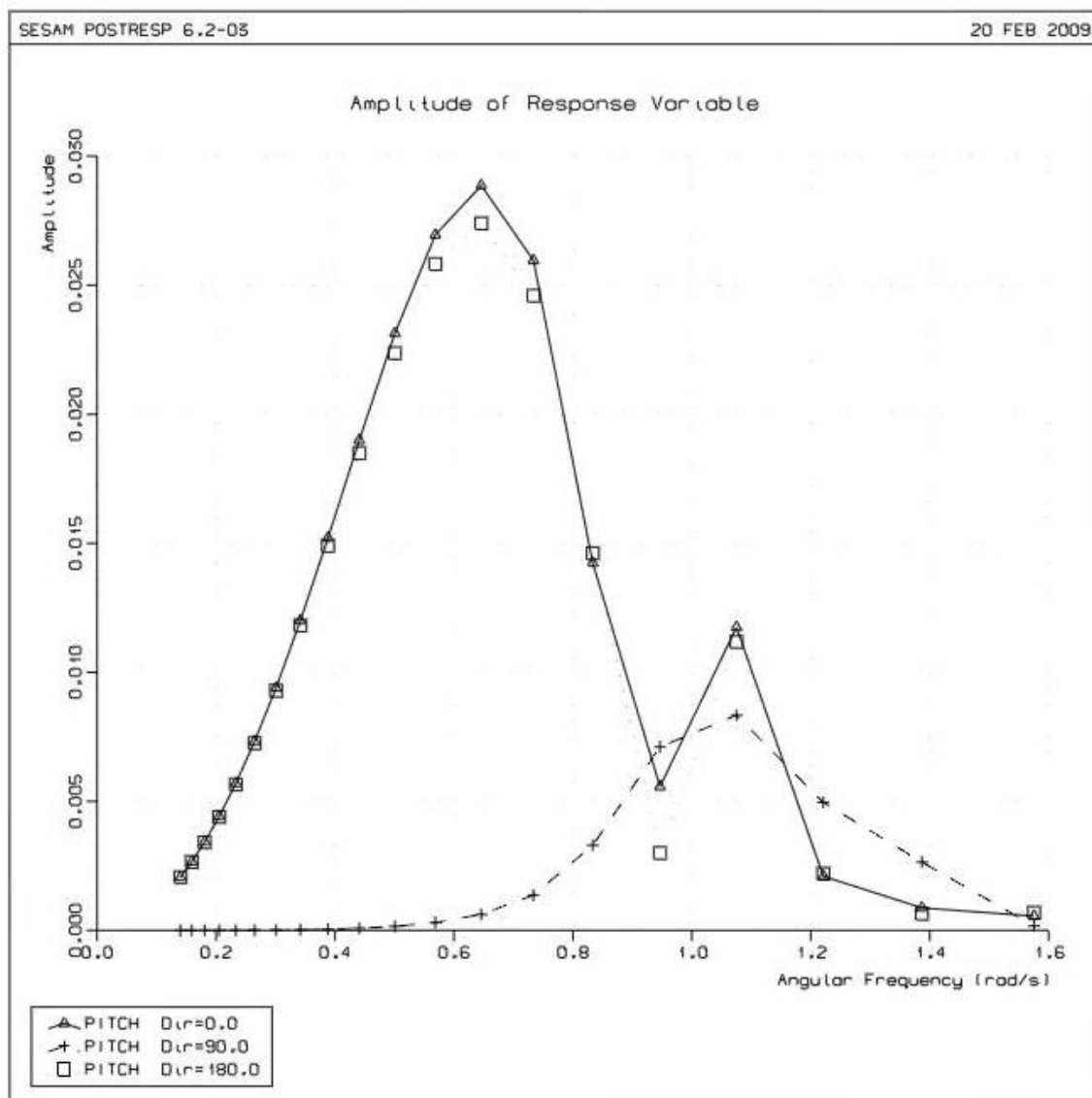
Sl.5.5 Prijenosna krivulja posrtanja



Sl. 5.6 Prijenosne krivulje poniranja za različite susretne kuteve



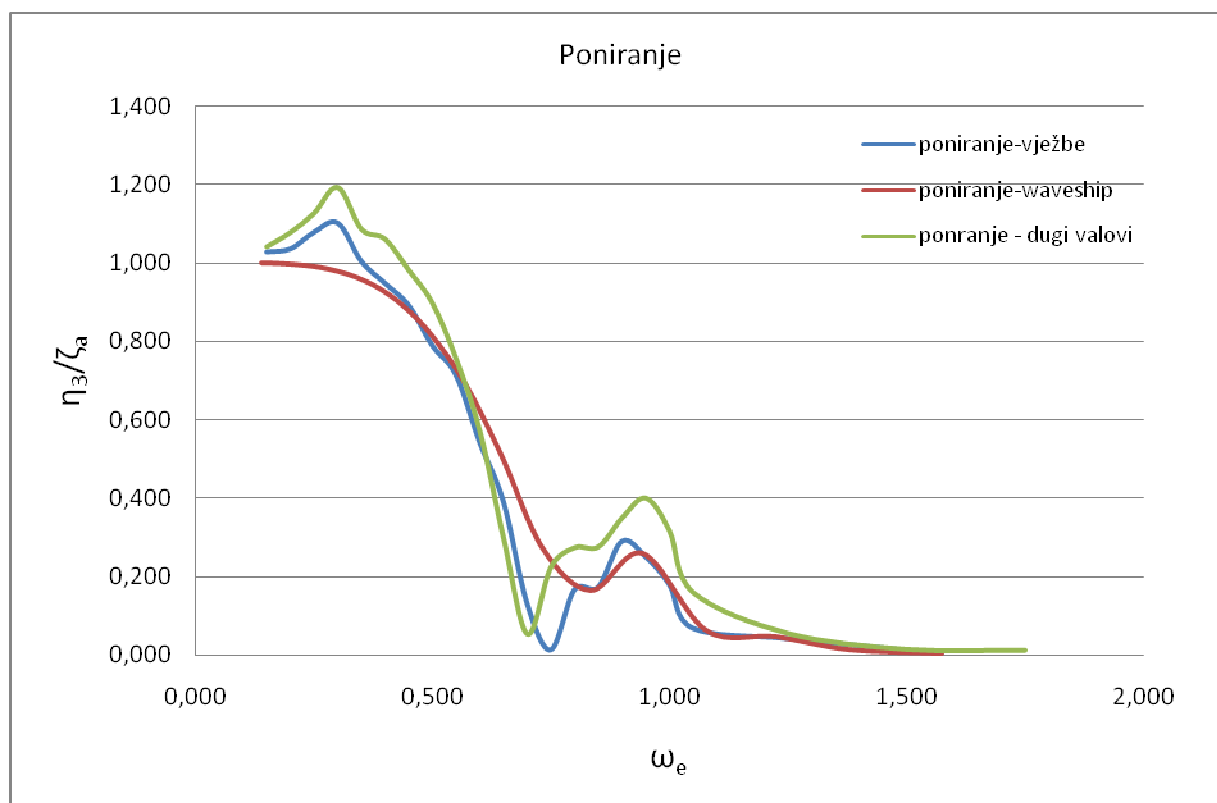
Sl. 5.7 Prijenosne krivulje posrtanja za različite susretne kuteve



6 ZAKLJUČAK

Na zajedničkom dijagramu poniranja, najviše odstupa prijenosna krivulja dobivena metodom broda na dugačkom harmonijskom valu. Krivulja dobivena korištenjem koeficijenata za polukružne presjeke ne odstupa toliko od krivulje dobivene WAVESHIP-om. Na frekvencijama iznad $1,2 \text{ s}^{-1}$ krivulje se dovoljno poklapaju. Treba uzeti u obzir da forma ovog broda nije standardna, što bitno utječe na rezultate.

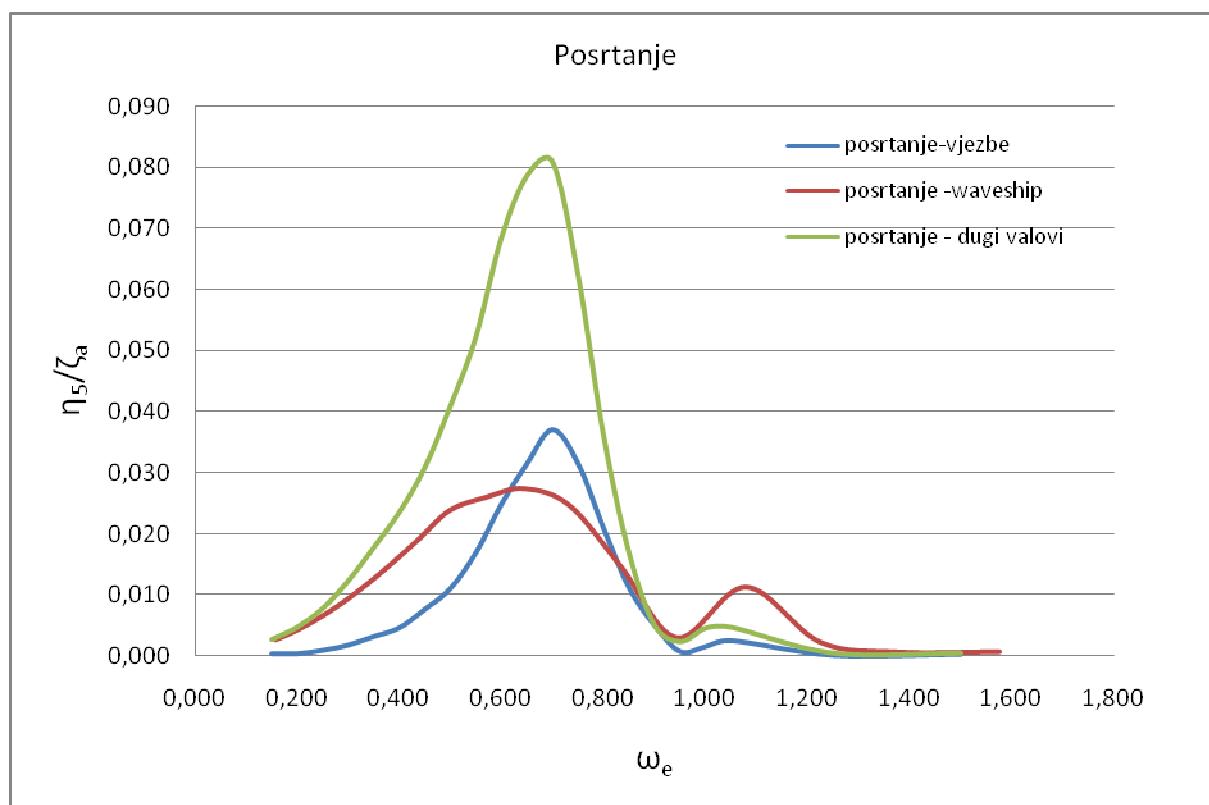
Sl.6.1 Zajednčki dijagram poniranja



Sve krivulje posrtanja teže 0 na rubovima, s time da krivulja dobivena korištenjem koeficijenata za polukružne forme manje odstupa od

prijenosne krivulje dobivene pomoću programa WAVESHIP, dok drugi dio bolje prati metoda broda na dugačkom harmonijskom valu.

Sl. 6.2 Zajednički dijagram posrtanja



7 LITERATURA

- [1] Cvetko, I. : Programski zadatak iz kolegija Osnovne teorije Pomorstvenosti; FSB, 2008.
- [2] Prpić-Oršić, J., Čorić, V. : Pomorstvenost plovnih objekata; Zigo, Rijeka, 2006.
- [3] WAVESHIP, SESAM , Users Manual; DnV, 1993.